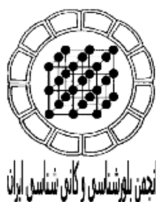
مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران

مقاله پژوهشی

سال بیست و هشتم، شمارهٔ سوم، پاییز ۹۹، از صفحهٔ ۷۱۱ تا ۷۲۲



شواهد باریت گرمابی در منطقه مشکان، شمال‌شرق سبزوار: کانی‌شناسی، زمین‌شیمی و سیال‌های درگیر

شریفه محمدی‌پور[1]، آزاده ملکزاده شفارودی[2*]، مریم جاویدی مقدم[1]

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- گروه زمین‌شناسی و گروه پژوهشی اکتشاف ذخایر معدنی شرق ایران، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(دریافت مقاله: ۹۸/۷/۲۸، نسخه نهایی: ۹۸/۱۱/۱)

چکیده: منطقه اکتشافی باریت مشکان در شمال‌شرق سبزوار در استان خراسان رضوی واقع است. زمین‌شناسی منطقه شامل واحدهای رسوبی کنگلومرا، ماسه‌سنگ، آهک با میان لایه‌های شیل، شیل با میان لایه‌های ماسه‌سنگ و واحدهای آتشفشانی آندزیت و تراکی آندزیت به سن ائوسن است. باریت با بافت‌های پرکننده فضای خالی، توده‌ای، شعاعی و صفحه‌ای در رگه‌هایی با راستای بیشتر شمال غرب–جنوب‌شرق ایجاد شده‌است. کانی‌شناسی منطقه شامل باریت، کوارتز، کلسیت و کانی‌های ثانویه مالاکیت، آزوریت، گوتیت و هماتیت است. کانی‌سازی رگه‌ای در دو مرحله کانی‌سازی اصلی (باریت+کوارتز) و فاز تاخیری (کلسیت) تشکیل شده است. سیال‌های درگیر در نمونه‌های کوارتز و باریت بی‌شکل تا شکل‌دار (مخروطی و میله‌ای) و با اندازه حدود ۴ تا ۱۲ میکرون هستند. بر پایه بررسی سیال های درگیر اولیه در بلورهای کوارتز و باریت همزمان با مرحله اصلی کانی‌سازی رگه‌ای، کمترین دمای تشکیل کانی‌سازی ۱۸۱ تا ۳۷۰ درجه سانتی‌گراد و شوری ۶/۵ تا ۱۳/۶ درصد وزنی است. بیشترین بی‌هنجاری‌های زمین شیمی در رگه‌ها برای روی ۳۹۴ گرم در تن، آنتیموان ۵۲ گرم در تن و سرب ۹۰ گرم در تن است. شواهدی چون کنترل ساختاری (گسل) کانی‌سازی، زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، زمین شیمی و سیال های درگیر نشان دهنده شکل‌گیری رگه‌ها در شرایط گرمابی هستند. کاهش دما و آمیختگی با سیالی با شوری بالا در دگرگونی سیال های گرمابی و در نهایت شکل‌گیری رگه‌ها موثر بوده است.

واژه‌های کلیدی: *کانی‌شناسی؛ ژئوشیمی؛ سیال‌های درگیر؛ باریت؛ مشکان؛ خراسان رضوی.*

مقدمه

حدود ۱۰۰ کانسار و منطقه پی جویی کوچک باریت در ایران وجود دارند که ذخائر آن‌ها به حدود ۱۰ میلیون تن می‌رسد [۱]. سن کانی‌سازی‌ها که بیشتر بر اساس سن سنگ میزبان براورد شده‌است، از اواخر پرکامبرین تا میوسن متغیر است [۲]. بزرگترین ذخایر باریت ایران در پهنه‌های البرز مرکزی و ایران مرکزی دیده شده‌اند و سنگ میزبان آنها بیشتر دولومیت یا سنگ‌های آتشفشانی-رسوبی است [۲]. منطقه اکتشافی باریت مشکان به مساحت یک کیلومتر مربع در ۵۵ کیلومتری شمال-شرق شهرستان سبزوار، در استان خراسان رضوی بین طول‌های جغرافیایی ۱۶ً ۶ ́ ۵۸° تا ۵۸ ́ ۶ ́ ۵۸° و عرض‌های جغرافیایی ۳۶ً ۳۷ ́ ۳۶° تا ۸ً ۳۸ ́ ۳۶° واقع است. این منطقه از نظر تقسیمات ساختاری در مرز بین فاصله پهنه‌های البرز شرقی، بینالود و شمال پهنه افیولیتی سبزوار قرار دارد (شکل ۱). منطقه مورد بررسی در جنوب کمان ماگمایی سنوزوییک قوچان-سبزوار واقع است. این کمان ماگمایی با سن ائوسن تا پلیستوسن در افیولیت سبزوار و پیرامون آن نفوذ کرده است و از شمال تا کوه‌های البرز ادامه دارد [۳].

در مجموعه کمان ماگمایی قوچان-سبزوار، معادن (فیروزه نیشابور [۴]، آهن شترسنگ [۵]، آهن کلاه ابوذر [۶]) و چند

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۵۱۳۸۸۰۵۴۸۸، نمابر: ۰۵۱۳۸۷۹۶۴۱۶، پست الکترونیکی: shafaroudi@um.ac.ir

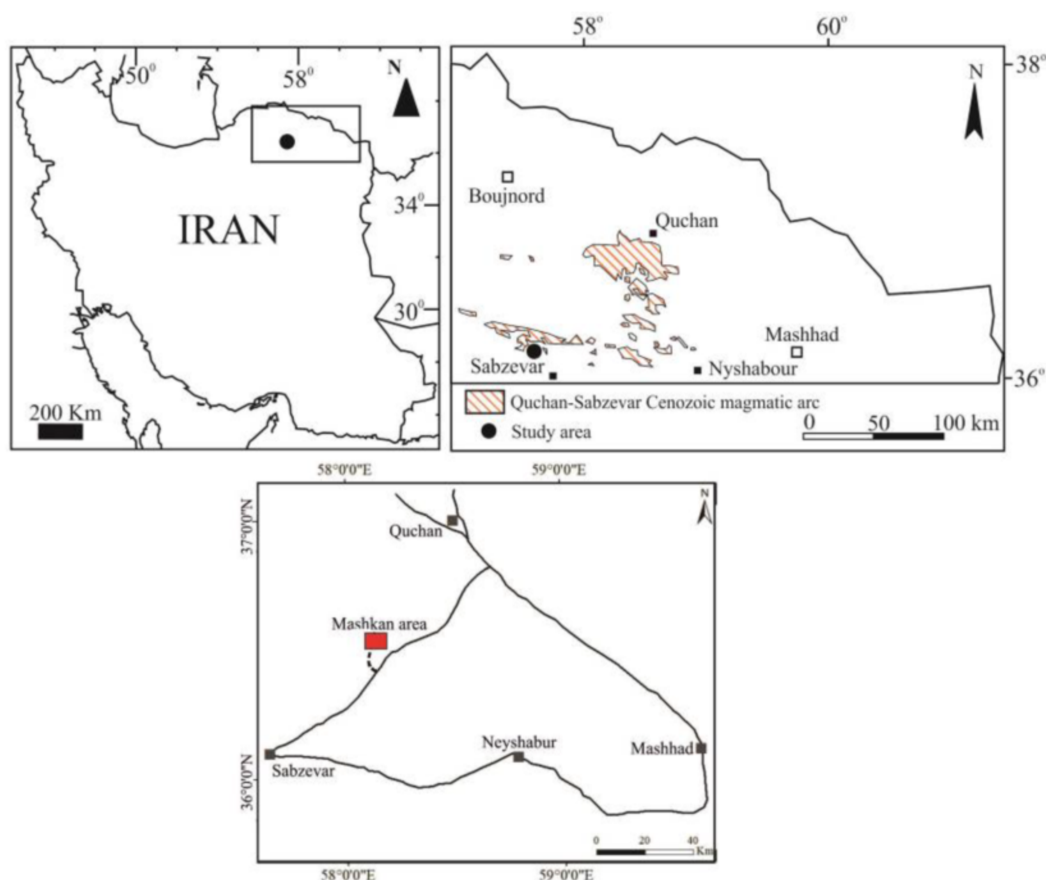
[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.3.13.7]

[DOI: 10.29252/ijcm.28.3.711]

منطقـه اکتشـافی (مـس-طـلای پـورفیری جلمبـادان [۷] و مگنتیت-آپاتیت خانلق [۸]) وجـود دارد کـه نشـانگر پتانسـیل بالای کانی‌سازی در این کمان ماگمایی است. با وجـود بررسـی های جامع بر انواع کانی‌سازی‌های مس، طـلا و آهـن در کمـان ماگمایی قوچان-سبزوار ، پژوهشی پیرامون کـانی‌سـازی باریـت در این کمان انجام نشده است. تنها نتایج منتشر شده پیرامـون منطقه مـورد بررسـی شـامل نقشـه ۱:۱۰۰۰۰۰ مشـکان [۹] و گـزارش پایـان عملیـات اکتشـاف باریـت مشـکان [۱۰] اسـت. تاکنون بررسی جامع و گسترده‌ای بر ویژگی‌های کـانی‌شناسـی باریت و سیال های عامل کانی‌سازی در ایـن منطقـه اکتشـافی انجام نشده است. در این پـژوهش، نـوع کـانی‌زایـی و چگـونگی تشکیل آن بر پایه بررسی های زمـین‌شناسـی، کـانی‌شـناختی، بافت، زمین شیمیایی و سیال های درگیر مشخص شـده اسـت. این کانسار بزرگترین کانی‌سازی باریت شناخته شـده در کمـان ماگمـایی قوچـان-سـبزوار محسـوب مـی‌شـود و از آنجـا کـه کانسارهای باریت در این کمان کمتر بررسی شـده‌انـد، بررسـی جامع و تعیین خاستگاه آن کمک شـایانی بـه اکتشـاف چنـین کانسارهایی در این پهنه فلززایی در شمال‌شرق ایران است.

روش کار

در راستای دستیابی به اهداف مورد نظر، بررسی های صحرایی و نمونه‌برداری از واحدهای سنگی و رگه‌ها در منطقه اکتشـافی باریت مشکان انجام شد. بـیش از ۶۰ نمونـه سـنگی از منطقـه مورد بررسی جمع آوری شد که از این میان، ۲۵ مقطـع نـازک برای بررسی‌های سنگ‌نگاری و ۱۰ مقطع نازک صیقلی و قطعه صیقلی برای بررسی کانی‌های فلزی تهیه شـدند. نقشـه زمـین-شناسی-کانی‌سـازی در نـرم افـزار ArcGIS تهیـه گردیـد. بـه منظور اکتشاف‌های شـیمیایی، ۱۰ نمونـه زمـین شـیمیایی بـه روش خرده سنگی از رگه‌های کانی‌سازی برداشت شد که از این میان، ۹ نمونه به روش طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت شده القـایی (ICP-MS) بـرای عناصـر معـدنی و ۵ نمونـه بـه روش عیارسنجی گرمایی برای عنصر طلا در آزمایشگاه زرآزما تجزیـه شدند. همچنین به منظور تفسیر زمین شیمیایی دقیق‌تر کانی-سازی باریت، از نتایج تجزیه ۱۵ نمونه از منطقه به روش طیـف سنجی فلئورسانی پرتوی X (XRF) [۱۰] استفاده شد.



شکل ۱ جایگاه منطقه مشکان در شمال‌شرق ایران و راه‌های دسترسی به آن همراه با موقعیت کمربند ماگمایی قوچان-سبزوار.

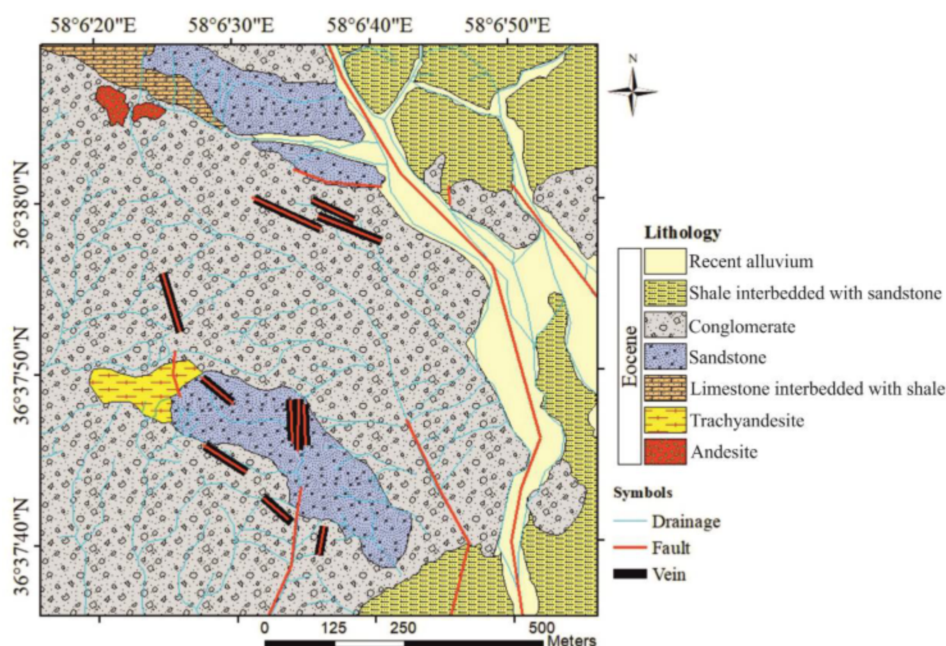
برای بررسی سیالات درگیر، تعداد ۵ مقطع دوبرصیقل از کانی‌های باریت، کوارتز و کلسیت تهیه شد. آزمایش‌های لازم توسط یک دستگاه سرد کننده و گرم کننده ساخت شرکت لینکام مدل THM 600 در دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. دقت کار دستگاه در مرحله سرمایش و گرمایش کردن $\pm 1^{\circ}C$ و گستره دمایی دستگاه ۱۹۰- تا ۶۰۰+ درجه سانتیگراد است. مقدار شوری در سامانه H_2O-NaCl با استفاده از نرم افزار تعبیه شده در سیستم اکسل HOKIEFLINCS-H_2O–NaCl [۱۱] محاسبه شد. سپس، نمودارهای مناسب در نرم افزار SPSS رسم شدند.

زمین‌شناسی ناحیه‌ای

پس از تشکیل و جایگیری مجموعه افیولیتی سبزوار و ادامه فرورانش پوسته اقیانوسی نئوتتیس سبزوار به زیر صفحه توران، فعالیت‌های ماگمایی از اوایل ائوسن آغاز شد و به دلیل تداوم فرورانش پوسته اقیانوسی و هضم آن، آخرین فراورده‌های ماگمایی آن تا پلیو-پلیستوسن فوران داشته است. این امر باعث تشکیل کمان ماگمایی قوچان-سبزوار شد. سنگ های آتشفشانی و نفوذی کمان بر اساس بررسی های علوی [۳] به سه گروه سنگ‌های آذرین حدواسط ائوسن، سنگ‌های اسیدی الیگوسن-پلیوسن و سنگ‌های قلیایی میوسن-پلیستوسن (بازالت قلیایی و شوشونیت) تقسیم می‌شود. سن سنگ‌های آذرین این کمان از ائوسن در جنوب (در نزدیکی افیولیت سبزوار) تا پلیو-پلیستوسن در شمال (جنوب قوچان) تغییر می‌کند. جوانترین واحدهای سنگی در مقیاس ناحیه‌ای نیز رسوب‌های آواری و نهشته‌های کواترنری هستند.

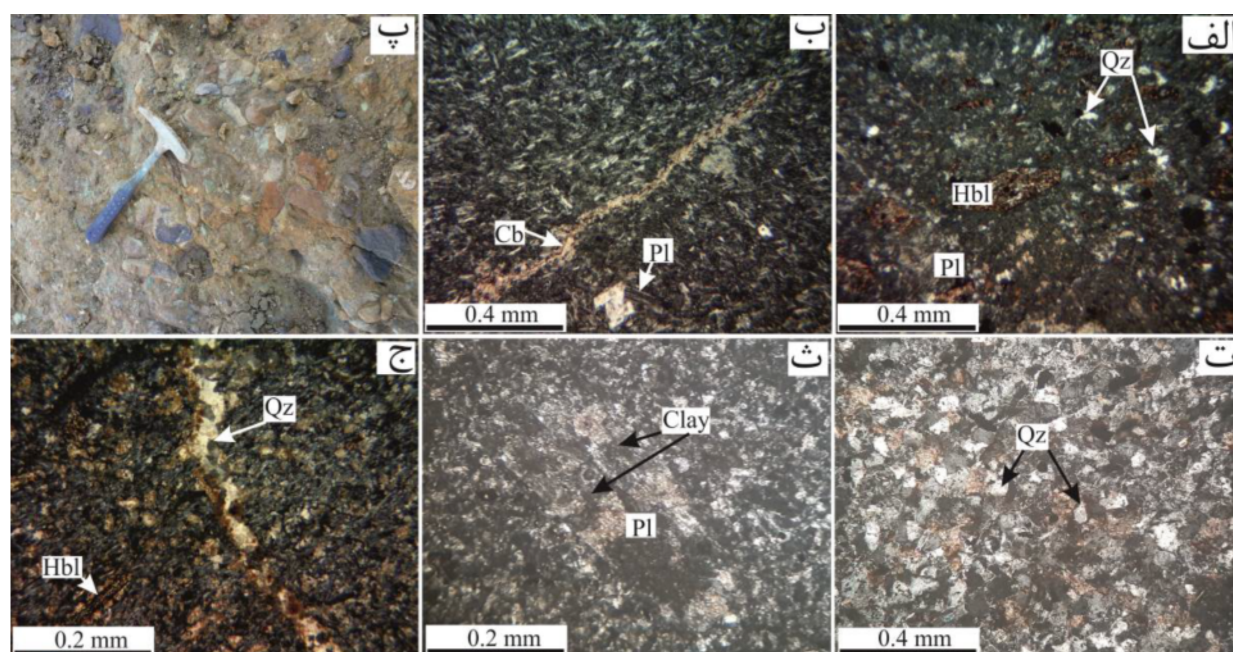
زمین‌شناسی

منطقه اکتشافی باریت مشکان در بخش شرقی نقشه زمین-شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ مشکان [۹] واقع است. بر اساس بررسی های صحرایی و آزمایشگاهی، واحدهای سنگی شناسایی شده در منطقه شامل واحدهای آتشفشانی (آندزیت، تراکی‌آندزیت) و رسوبی (کنگلومرا، ماسه‌سنگ، آهک با میان لایه‌های شیل و شیل با میان لایه‌های ماسه‌سنگ) به سن ائوسن هستند. قدیمی‌ترین واحدهای شناسایی شده در منطقه شامل واحدهای آتشفشانی آندزیت و تراکی آندزیت هستند. واحد آندزیتی با گسترش بسیار کم در شمال‌غرب منطقه رخنمون دارد (شکل ۲). این واحد دارای بافت پورفیری بوده و شامل درشت بلورهایی از پلاژیوکلاز (۲۰-۱۵ درصد)، فلدسپارقلیایی (۵-۳ درصد)، هورنبلند (۱۰-۸ درصد) و بیوتیت (۵-۳ درصد) است (شکل ۳ الف). در این واحد، هورنبلندها اپاسیتی شده‌اند. این امر در اثر اکسایش گرمابی، تغییرات دما، نرخ سرد شدگی و فوران، کاهش فشار جانبی و در گریزندگی اکسیژن بالا انجام می‌شود [۱۲]. وجود هورنبلند با لبه سوخته نشان از افت ناگهانی فشار بخار آب طی صعود ماگما دارد [۱۳].



شکل ۲ نقشه زمین‌شناسی-کانی‌سازی منطقه مشکان.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.3.13.7]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.3.711]



شکل ۳ تصاویر میکروسکوپی و صحرایی از واحدهای سنگی و دگرسانی منطقه اکتشافی باریت مشکان. الف) واحد آندزیت با هورنبلندهای اپاسیتی شده، ب) واحد تراکی آندزیت دارای رگچه‌های کربناته، پ) رخنمون واحد کنگلومرایی در صحرا، ت) واحد ماسه‌سنگی، ث) دگرسانی آرژیلیک در واحد آندزیتی، ج) کوارتز به صورت رگچه‌ای و پراکنده در واحد آندزیتی. تصاویر میکروسکوپی در XPL گرفته شده است. اختصارات: Qz= کوارتز، Hbl= هورنبلند، Pl= پلاژیوکلاز، Cb= کربنات [۱۴].

واحد تراکی‌آندزیتی نیز گسترش بسیار کمی در غرب منطقه دارد (شکل ۲). این واحد بافت پورفیری تا تراکیتی دارد و کانی‌های تشکیل دهنده آن شامل ۲۰ تا ۲۵ درصد پلاژیوکلاز، ۵ تا ۱۰ درصد فلدسپارقلیایی و ۸ تا ۱۰ درصد هورنبلند هستند (شکل ۳ ب).

واحد کنگلومرایی بیشترین گسترش را در منطقه مورد بررسی دارد (شکل ۲) و سنگ میزبان اصلی کانی‌سازی است. این واحد شامل قطعه‌هایی با اندازه چند میلی‌متر تا حدود ۲۰ سانتی‌متر و گرد شدگی خوب تا متوسط است (شکل ۳ پ). جنس قطعه‌های واحد کنگلومرایی متفاوت است و اغلب سیلیسی با گرد شدگی بسیار خوب تا آتشفشانی چون آندزیت و تراکی آندزیت هستند.

واحد ماسه‌سنگی در شمال و جنوب منطقه گسترش یافته است (شکل ۲). این واحد به رنگ قرمز تا نخودی بوده و بیشتر از کوارتز و کمتر کربنات و فلدسپار تشکیل شده است (شکل ۳ ت). همچنین، واحدهای آهک با میان لایه‌های شیل به رنگ نخودی در شمال منطقه و شیل با میان لایه‌های ماسه‌سنگ به رنگ خاکستری تا سبز در شمال‌شرق و جنوب‌شرق منطقه رخنمون دارند (شکل ۲).

دگرسانی و کانی‌سازی

کانی‌سازی رگه‌ای باریت در منطقه کنترل گسلی داشته و راستای این رگه‌ها بیشتر شمال‌غرب-جنوب شرقی است و تعداد کمی نیز راستای شمالی- جنوبی دارند. شیب رگه‌ها اغلب ۱۰ تا ۶۰ درجه به سمت جنوب و گاهی به سمت شمال است. عرض این رگه‌ها ۳ تا ۱۰ متر و طول آنها از ۲۰ تا ۱۰۰ متر متغیر است. سنگ میزبان رگه‌ها بیشتر واحد کنگلومرایی و کمتر واحد ماسه‌سنگی است.

دگرسانی در لبه رگه‌ها بسیار محدود بوده و اغلب تا فاصله چند متری از رگه قابل دیده است. دگرسانی‌های لبه رگه شامل آرژیلیک (شکل ۳ ث)، سیلیسی (شکل ۳ ج) و کربناتی است. در واحد کنگلومرایی، دگرسانی‌ها بیشتر بر قطعه‌های این واحد اثر گذاشتند و تفاوتی از نظر شدت دگرسانی و جنس قطعه‌ها دیده نشد. گفتنی است که قطعه‌های سیلیسی در این واحد بدون دگرسانی هستند. دگرسانی آرژیلیک در لبه رگه و سنگ میزبان کانی‌سازی شناسایی شد. در این دگرسانی، فلدسپارها بیشتر (۱۰ تا ۱۵ درصد) به کانی‌های رسی (شکل ۳ ث) و کمتر (۳ تا ۵ درصد) به سرسیت تبدیل شده‌اند. دگرسانی سیلیسی شامل شکل‌گیری کوارتز همراه با کانی‌سازی باریت

[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.3.13.7]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.3.711]

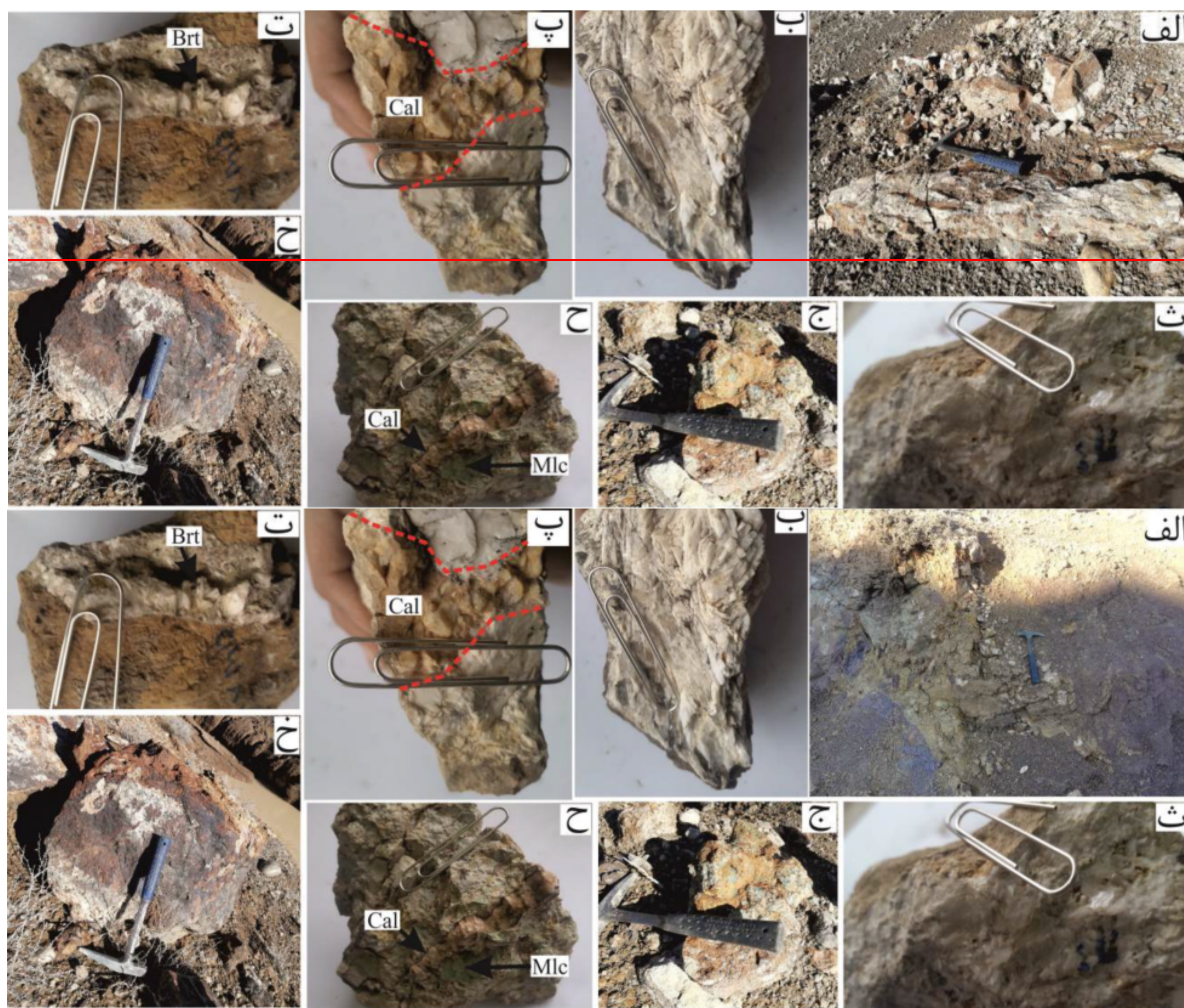
است. این کوارتزها به اندازه چند ده میکرون تا ۲ میلی‌متر، اغلب به صورت پراکنده در زمینه سنگ یا رگچه‌ای شکل گرفته‌اند (شکل ۳ ج). دگرسانی کربناتی شامل رگه و رگچه‌های کلسیتی است. این رگه و رگچه‌ها (شکل ۳ ب) در قسمت‌هایی رگه‌های دربردارنده کانی‌سازی را قطع نموده‌اند. کلسیت به صورت شکل‌دار و به اندازه ۰٫۲ تا ۵ میلی‌متر است.

کانی‌سازی در منطقه باریت مشکان را می‌توان به دو مرحله کانی‌سازی اصلی (باریت+کوارتز) و فاز تاخیری (کلسیت) تقسیم نمود (شکل ۴). در رگه‌های باریت+کوارتز، باریت دارای بافت‌های پرکننده فضای خالی، توده‌ای، صفحه‌ای و شعاعی است (شکل‌های ۵ الف تا ث) و همچنین به صورت رگچه‌ای در شکستگی‌های واحدهای کنگلومرایی دیده می‌شود. در بعضی نمونه‌های دستی، بلورهای کانی باریت به صورت سوزنی شکل با اندازه‌های ۱ تا ۲ سانتی متر دیده شد. باریت بیش از ۹۰ درصد رگه‌ها را دربر گرفته است.

کانی ها	مرحله کانی سازی اولیه	مرحله تاخیری	زون اکسیدی
پیریت			
کوارتز			
باریت			
کلسیت			
کانی رسی			
سرسیت			
هماتیت			
گوتیت			
مالاکیت			
آزوریت			

شکل ۴ توالی همبری کانی‌سازی در منطقه اکتشافی باریت مشکان.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.3.13.7]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.3.711]



شکل ۵ تصاویر صحرایی و نمونه دستی از کانی‌سازی منطقه اکتشافی باریت مشکان. الف) رخنمون رگه باریت در صحرا، ب) باریت با بافت صفحه‌ای، پ) باریت با بافت صفحه‌ای که توسط رگه کلسیتی قطع شده، ت) باریت با بافت شعاعی، ث) باریت با بافت توده‌ای، ج) آزوریت همراه با اکسید آهن در واحد کنگلومرایی، ح) کانی‌سازی مالاکیت در واحد کنگلومرایی که توسط رگچه کلسیتی قطع شده است، خ) اکسیدهای آهن (هماتیت و گوتیت). اختصارات: Cal= کلسیت، Brt= باریت، Mlc= مالاکیت [۱۴].

پیریت در رگه و رگچه‌ها شناسایی نگردید، اما غالب پیریت که به طور کامل به گوتیت تبدیل شده در بعضی رگه‌ها دیده شد. تنها باطله همراه با کانی‌سازی کوارتز است. شکل‌گیری کوارتز به لبه رگه و سنگ دیواره محدود است. کوارتز با بافت پر کننده فضای خالی و اندازه ۲۰ میکرون تا ۱ میلی‌متر، درهمرشدی با کانی باریت و یا پراکنده در سنگ میزبان با اندازه ۲۰ تا ۵۰ میکرون شناسایی شد. همچنین، کوارتزهای نهان بلورین به صورت پرکننده فضای خالی شناسایی گردیدند. کوارتز کمتر از ۵ درصد رگه‌ها را تشکیل می‌دهد.

رگه و رگچه‌های کلسیتی در بعضی قسمت‌ها رگه‌های باریت+کوارتز منطقه را قطع نموده‌اند (شکل‌های ۵ پ و ح). کلسیت به صورت نیمه‌شکل‌دار تا شکل‌دار با اندازه ۰٫۲ تا ۳ میلی‌متر در رگه‌هایی به عرض ۲۰ تا ۷۰ سانتی‌متر شکل گرفته است. اندازه این کانی در رگچه‌های کلسیتی، بین چند ده میکرون تا ۱ میلی‌متر است.

کانی‌های ثانویه مس‌دار شناسایی شده در منطقه شامل آزوریت و مالاکیت هستند. این کانی‌ها بیشتر در حفره‌ها و درز و شکستگی‌ها شکل گرفته‌اند (شکل‌های ۵ ج و ح) و شواهدی از کانی‌های سولفیدی به صورت باقیمانده دیده نشد. اکسیدهای آهن در اثر اکسایش و هوازدگی کانیهای اولیه شکل گرفته‌اند. اکسیدهای آهن در سطح بیشتر به صورت آغشتگی در سطح رگه‌ها و کمتر به صورت رگچه‌ای شناسایی

شدند (شکل ۵ خ). گوتیت اکسید آهن اصلی ناشی از جانشینی پیریت در اثر اکسایش به صورت پراکنده، رگچه‌ای و بافت گل کلمی دیده می شود.

زمین شیمی باریت و رگه‌ها

توزیع عناصر در واحدهای سنگی و بررسی وابستگی آنها به هم، از مهم‌ترین موارد بررسی‌های زمین‌شیمیایی است که با استفاده از آن می‌توان به محیط و فرایندهای اثرگذار در پدیده‌های مختلف زمین‌شناسی پی برد [۱۵، ۱۶].

شیمی باریت: بر اساس نتایج تجزیه ها، (جدول ۱) مقدار Sr باریت در رگه‌ها از ۰/۵۲ تا ۲/۲۷ درصد متغیر است که این مقدار برابر با ۱/۰۹ تا ۴/۷۹ درصد $SrSO_4$ است. این مقدار $SrSO_4$ نشان می‌دهد که باریت‌های مشکان در سری انحلال جامد باریت- سلستیت وابسته به عضو نهایی باریت هستند. مقدار Ba نیز از ۲۱/۲۷ تا ۵۵/۱۸ درصد متغیر است. مقدار SiO_2 از ۲/۴۶ تا ۴۴/۸ درصد بوده که مربوط به حضور کوارتز در این رگه‌هاست. مقدار CaO از ۰/۱۵ تا ۲۸ درصد است که بستگی به مقدار کلسیت در رگه‌ها دارد. مقدار TiO_2 کمتر از ۰/۶۲ درصد است. مقدار کم TiO_2 اغلب در باریت‌های گرمابی دیده می‌شود (در شرایط گرمابی، کمتر از ۱ دصد)، زیرا در این نوع ذخایر عناصر گرمابی اغلب غنی شده و مواد Ti دار کمتری وارد می‌شوند [۱۷]. مقدار Fe_2O_3 در رگه‌ها نیز از ۰/۴۲ تا ۷/۳۶ درصد متغیر بوده که به دلیل حضور اکسیدهای آهن در رگه‌هاست.

جدول ۱ نتایج تجزیه نمونه‌های زمین شیمیایی مورد بررسی به روش XRF در منطقه‌های باریت مشکان [۱۰] (برحسب درصد).

Sample .N	49208	49209	49210	49211	49212	49213	49214	49215	49216	49217
BaO	۳۳/۳	۲۳/۹	۴۸/۹	۵۶/۴	۳۶	۶۰/۳	۴۹/۶	۴۵/۶	۳۷/۶	۵۲/۲
SO_3	۱۷/۹	۱۲/۹	۲۶/۳	۳۱/۵	۱۹/۶	۳۲/۸	۲۶/۶	۲۵/۳	۲۰/۴	۲۷/۸
SrO	۰/۶۶	۰/۶۲	۰/۹۹	۲/۷۱	۱/۰۷	۱/۷۱	۰/۹۹	۱/۹۸	۱/۰۱	۰/۷۴
SiO_2	۱۶	۳/۷۳	۱۱/۰۲	۲/۴۶	۷/۱۸	۲/۶۳	۱۵/۱۲	۸/۷۱	۲۱/۳۱	۱۱/۱۵
TiO_2	۰/۴۶	۰/۲۶	۰/۵	۰/۶۵	۰/۴۵	۰/۶۱	۰/۵۶	۰/۵۱	۰/۵۸	۰/۵۳
Fe_2O_3	۴/۹۴	۵/۳۳	۵/۱۲	۳/۹۴	۷/۳۶	۰/۴۲	۲/۰۸	۴/۷	۵/۵۷	۴/۶۴
CaO	۳/۲۹	۲۸	۲/۴۸	۰/۳۸	۱۲/۴	۰/۴۴	۲/۸۸	۱/۲۱	۲/۴۴	۰/۱۵
MgO	۱۷/۳۱	۰/۴۳	۰/۳۸	۰/۲۷	۲/۲۵	۰/۱۹	۰/۴۳	۸/۹۱	۴/۹۸	۰/۴۲
CuO	-	۰/۰۲	-	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۳
LOI	۵/۰۲	۲۴/۲	۳/۴۷	۱/۰۴	۱۲/۴	۰/۴۵	۰/۵	۲/۲۳	۲/۳۷	۱/۳۳
نتایج محاسبه شده										
Ba	۲۶/۶۳	۲۱/۲۷	۴۳/۵۲	۵۰/۱۹	۳۲/۰۴	۵۳/۶۶	۴۴/۱۴	۴۴/۵۸	۳۳/۴۶	۴۶/۴۵
Sr	۰/۵۵	۰/۵۲	۰/۸۳	۲/۲۷	۰/۸۹	۱/۴۳	۰/۸۳	۱/۶۶	۰/۸۴	۰/۶۲
$SrSO_4$	۱/۱۶	۱/۰۹	۱/۷۵	۴/۷۹	۱/۸۹	۳/۰۲	۱/۷۵	۳/۵	۱/۷۸	۱/۳

زمین شیمی رگه‌ها: مقدار مس و سرب به ترتیب از ۲ تا ۱۱ گرم در تن (با میانگین ۵/۵ گرم در تن) و ۶ تا ۹۰ گرم در تن (با میانگین ۲۵/۲ گرم در تن) است (جدول ۲). بیشترین مقدار مس مربوط به حضور کانی‌های ثانویه مالاکیت و آزوریت در رگه‌هاست. مقدار نقره در رگه‌ها بسیار ناچیز و کمتر از ۰/۵۳ گرم در تن است. مقدار روی در نمونه‌های برداشت شده از محل رگه‌ها بین ۲۸ تا ۳۹۴ گرم در تن (با میانگین ۱۴۳/۳۳ گرم در تن) متغیر است (جدول ۳). همچنین مقدار آنتیموان نیز در رگه ها بین ۱ تا ۵۲ گرم در تن و مقدار طلا کمتر از ۵ میلی-گرم در تن است (جدول ۳).

سیال های درگیر

دماسنجی به روش گرمایش و تعیین نوع نمک‌ها و مقدار شوری به روش سرمایش بر سیال های درگیر کانی‌های کوارتز و باریت

(مرحله کانی‌سازی) و کلسیت (مرحله تاخیری) انجام شد. بر این اساس، اغلب سیال‌های درگیر در نمونه‌ها بی‌شکل تا شکل-دار و به صورت مخروطی و به مقدار کمتر میله‌ای هستند. اندازه سیال های درگیر بررسی شده حدود ۴ تا ۱۲ میکرون است. بر اساس تقسیم بندی‌های متداول [۱۹،۱۸]، این سیال‌ها از نوع

دو فازی غنی از مایع (LV) و بسیار کمتر تک فاز مایع (L) هستند (شکل ۶).

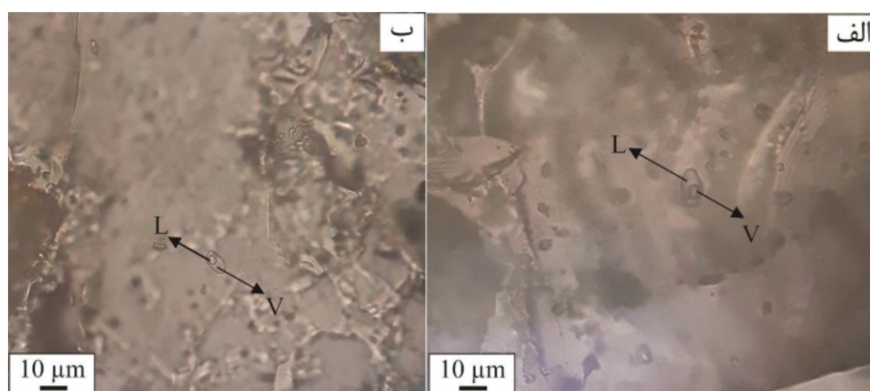
دمای همگن شدگی (Th) برای سیال‌های درگیر از کوارتز نسل اول ۳۱۰ تا ۳۷۵ درجه سانتی‌گراد با میانگین ۳۴۰ درجه سانتی‌گراد، کوارتز نسل دوم ۱۷۵ تا ۲۸۰ درجه سانتی‌گراد با میانگین ۲۱۳ درجه سانتی‌گراد، باریت ۱۸۱ تا ۲۰۴ درجه سانتی‌گراد با میانگین ۱۹۴٫۳ درجه سانتی‌گراد و کلسیت ۱۵۸ تا ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد با میانگین ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد است (جدول ۳ و شکل ۷ الف).

جدول۲ نتایج تجزیه نمونه‌های زمین‌شیمیایی خرده سنگی منطقه باریت مشکان به روش ICP-OES (برحسب ppm).

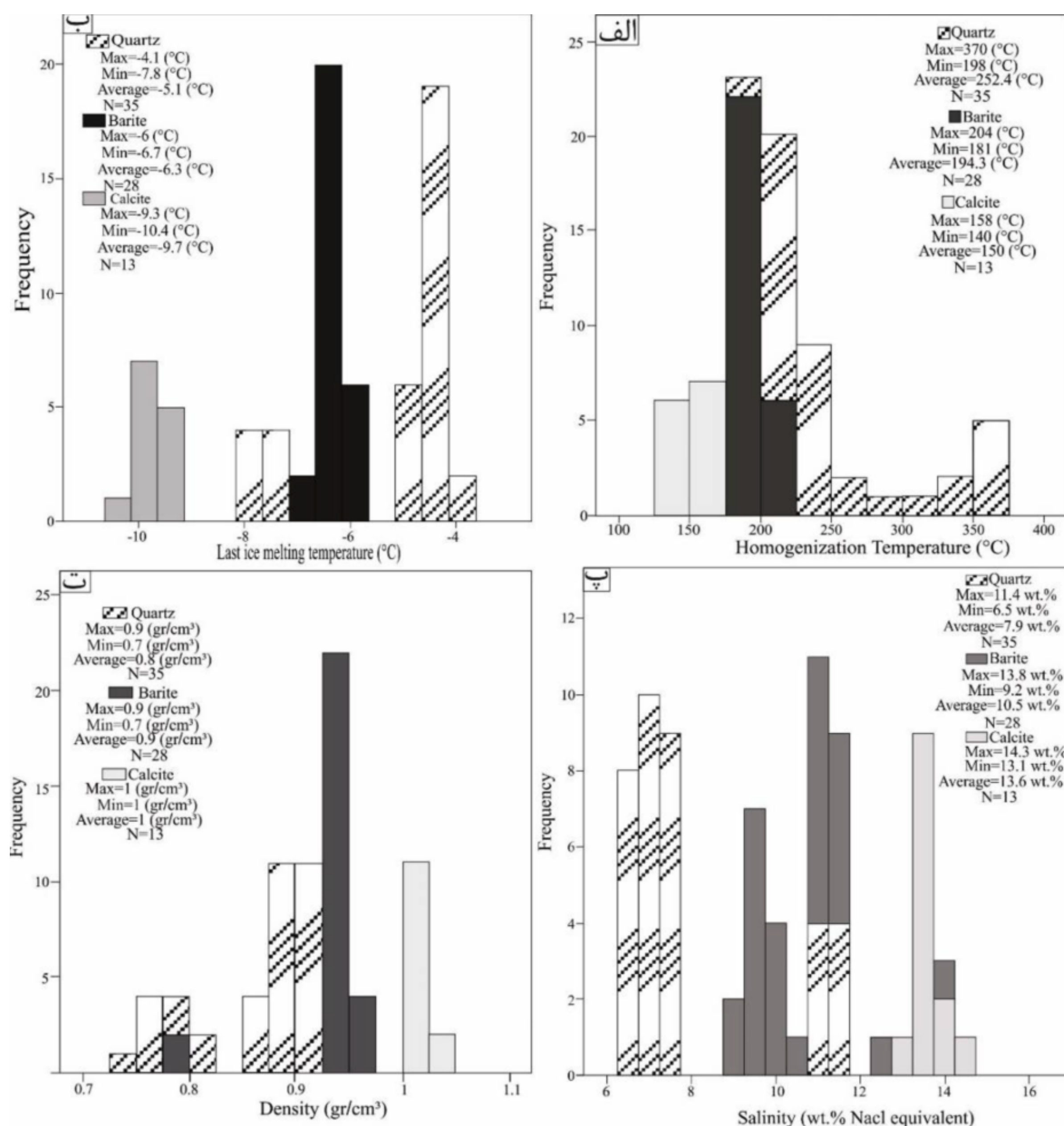
Sample N	A-01C	A-02C	A-03C	A-04C	A-05C	A-06C	A-10C	A-12C	A-13C
Ag (ppm)	۴۱	۴۴	۳۷	۴۳	۴۷	۲۸	۴۶	۴۱	۵۳
As (ppm)	۲	۲٫۵	۱٫۸	۱٫۹	۱٫۴	۲٫۳	۱٫۳	۱٫۶	۲٫۲
Ba (ppm)	۲۱۲۶	۳۴۰۸	۳٫۷	۲٫۳	۷۴٫۳	۱۳٫۲	۱۹٫۴	۲۲٫۸	۴۶۸۶
Cu (ppm)	۱۱	۶	۷	۵	۶	۵	۳	۵	۲
Pb (ppm)	۶	۶۷	۱۷	۷	۶	۲۱	۶	۷	۹۰
Sb (ppm)	۱٫۲	۹٫۶	۱۷٫۶	۵۲٫۴	۲۷	۲۷٫۹	۱٫۳۱	۱٫۳	۱۹٫۵
Zn (ppm)	۲۸	۳۹۴	۱۰۱	۶۴	۸۹	۲۸۴	۲۸	۳۰	۲۷۳

جدول ۳ نتایج بررسی‌های سیال‌های درگیر اولیه (P) در کانی‌های کوارتز، باریت و کلسیت در رگه‌های باریت منطقه مشکان.

چگالی (gr/cm^3)	شوری (wt.%Nacl)	Tm-ice (°C)	Th (°C)	تعداد	کانی میزبان	شماره نمونه
۰٫۹۲ تا ۰٫۸۹	۷٫۴ تا ۶٫۵	۴٫۱- تا ۴٫۷-	۱۹۸ تا ۲۲۴	۱۵	کوارتز	Mb36
۰٫۸۷ تا ۰٫۷۳	۱۱٫۴ تا ۶٫۷	۴٫۲- تا ۷٫۸-	۲۲۸ تا ۳۷۰	۲۰	کوارتز	Mb 30
۰٫۷۹ تا ۰٫۹۵	۱۳٫۸ تا ۹٫۲	۶٫۱- تا ۶٫۷-	۱۸۱ تا ۲۰۴	۱۴	باریت	Mb 32
۰٫۹۰ تا ۰٫۷۱	۱۳٫۶ تا ۱۰٫۱	۶٫۵- تا ۶٫۳-	۱۸۷ تا۲۰۰	۱۴	باریت	Mb 38
۱ تا ۱٫۰۲	۱۴٫۳ تا ۱۳٫۱	۹٫۳- تا ۱۰٫۴-	۱۵۸ تا ۱۴۰	۱۳	کلسیت	Mb37



شکل ۶ تصاویر میکروسکوپی از سیال‌های درگیر دوفازی (LV) در الف) کوارتز و ب) باریت.



شکل ۷ نمودارهای الف) دمای همگن‌شدگی، ب) دمای آخرین ذوب یخ، پ) مقدار شوری و ت) چگالی سیال‌های درگیر در رگه‌های باریت منطقه باریت مشکان.

نخستین دمای ذوب‌شدگی (T_{fm}) رابطه مستقیمی با ترکیب نمک موجود در سیال گرمابی دارد [۱۸،۱۹]. نخستین دمای ذوب شدگی در این سیال‌ها در گستره ۵۳٫۸- تا ۵۲- درجه سانتی‌گراد برای کوارتز نسل اول، ۵۳٫۴- تا ۵۲- درجه سانتی‌گراد برای کوارتز نسل دوم، ۵۳٫۶- تا ۵۲٫۳- درجه سانتی‌گراد برای باریت و ۵۳- تا ۵۲٫۱- درجه سانتی‌گراد برای کلسیت است. مقدار T_{fm} بدست آمده بیانگر حضور نمک‌های NaCl و $CaCl_2$ در سیال کانه‌سازی است.

دمای نهایی ذوب (T_m) نیز مقدار شوری را مشخص می‌کند. دمای نهایی ذوب برای کوارتز نسل اول ۵٫۲- تا ۴٫۱- درجه سانتی‌گراد، برای کوارتز نسل دوم ۷٫۸- تا ۷٫۵- درجه سانتی‌گراد، برای باریت ۶٫۷- تا ۶- درجه سانتی‌گراد و برای

کلسیت ۱۰٫۴- تا ۹٫۳- درجه سانتی‌گراد است (جدول ۳ و شکل ۷ ب).

مقدار شوری براساس سامانه $NaCl-H_2O$ [۱۸] برای سیال های درگیر از کوارتز نسل اول بین ۱۰٫۵ تا ۱۲ درصد وزنی NaCl با میانگین ۱۱٫۸۹ درصد وزنی NaCl، کوارتز نسل دوم بین ۶ تا ۸ درصد وزنی NaCl با میانگین ۷٫۶ درصد وزنی NaCl، نوع باریت بین ۹٫۲ تا ۱۳٫۸۳ درصد وزنی NaCl با میانگین ۱۰٫۵۱ درصد وزنی NaCl و برای نوع کلسیت بین ۱۳٫۱۷ تا ۱۴٫۳۵ درصد وزنی NaCl با میانگین ۱۳٫۶۲ درصد وزنی NaCl متغیر است (جدول ۳ و شکل ۷ پ).

چگالی این سیال‌ها بر پایه سامانه $NaCl-H_2O$ [۲۰] ۰٫۸۵ تا ۰٫۹۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب با میانگین ۰٫۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب برای کوارتز نسل اول، ۰٫۷۲ تا ۰٫۸۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب با میانگین ۰٫۷۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب برای کوارتز نسل دوم، ۰٫۷۱ تا ۰٫۹۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب با میانگین ۰٫۹۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب برای نوع باریت و ۱ تا ۱٫۰۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب با میانگین ۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب برای نوع کلسیت است (جدول ۳ و شکل ۷ ت).

بحث

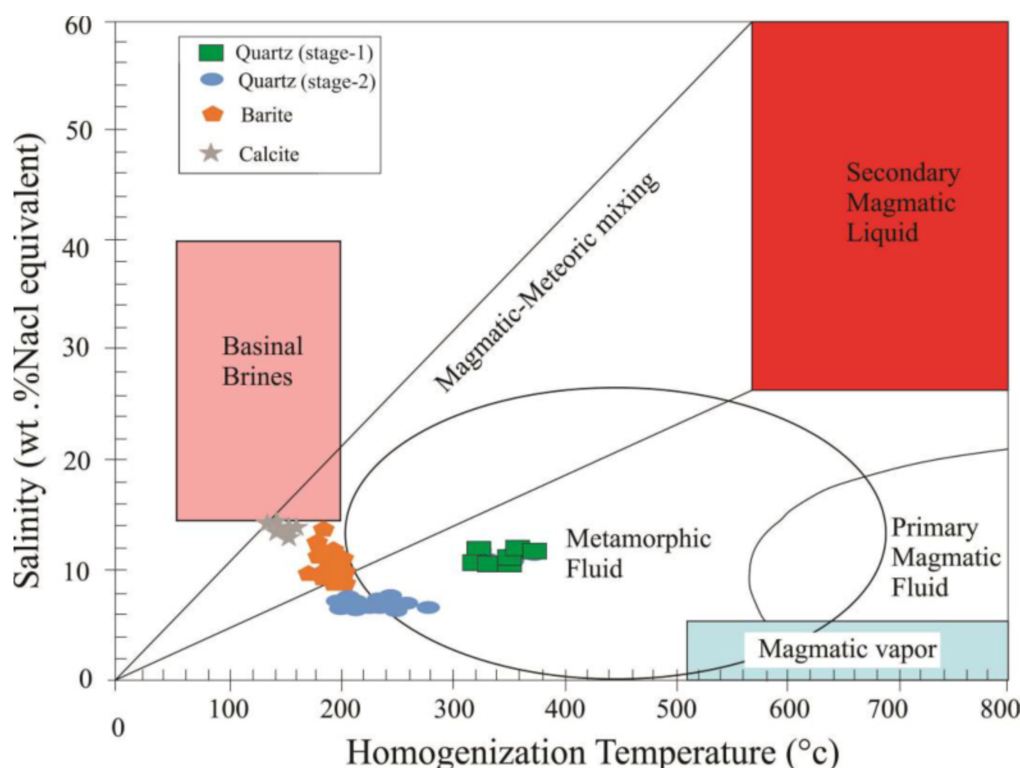
نمودار شوری نسبت به دمای همگن شدگی سیال‌های درگیر برای محیط آب‌های مختلف (شکل ۸) نشان می‌دهد که سیال‌های درگیر باریت و کلسیت در منطقه مشکان در گستره آمیختگی آب ماگمایی و آب‌های جوی و کوارتز در محیط آب‌های دگرگونی قرار دارند. از آنجا که آثار دگرگونی ناحیه‌ای در این منطقه وجود ندارد، فرضیه دخالت آب دگرگونی در حمل فلزات رد می‌شود. بنابراین می‌توان محلول کانه‌دار را آمیزه‌ای از آب ماگمایی و آب جوی در نظر گرفت.

آنچه در نمودار شوری–دمای همگن شدگی سیال‌های درگیر مورد توجه است، دو دسته شدن سیال ها با روند خطی مستقیم در کانی کوارتز است این امر نشان می‌دهد که دو نوع کوارتز در منطقه وجود دارد که از دو سیال با دما و شوری متفاوت تشکیل شده‌اند. دمای همگن شدگی و شوری سیال های درگیر برای نسل اول کوارتز به ترتیب ۳۱۰ تا ۳۷۵ درجه سانتی‌گراد و ۱۰٫۵ تا ۱۲ درصد وزنی نمک طعام اندازه‌گیری شد. این مقادیر برای سیال های درگیر مربوط به کانی کوارتز نسل دوم ۱۷۵ تا ۲۸۰ درجه سانتی‌گراد و ۶ تا ۸ درصد وزنی نمک طعام است (جدول ۳ و شکل ۹).

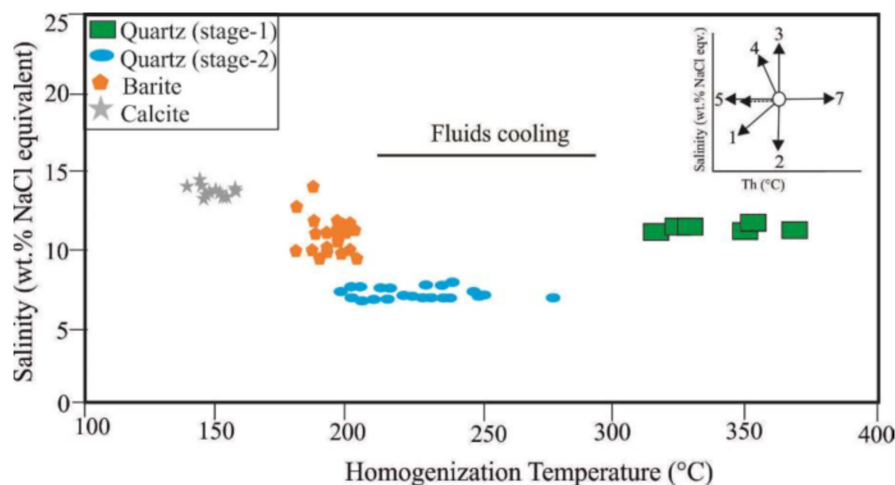
سیال ها در کانی‌های باریت نسبت به کوارتز دمای همگن شدگی کمتر و شوری بیشتری را نشان می‌دهند و کمترین دمای همگن شدگی (۱۴۰ تا ۱۵۸ درجه سانتی گراد) و بیشترین شوری (۱۳٫۱۷ تا ۱۴٫۳۵ درصد وزنی نمک طعام) در سیال های درگیر مربوط به کانی کلسیت در مرحله تاخیری است (شکل ۹). این شواهد نشان می‌دهد که همزمان با کاهش دما و افزایش شوری، نخست کانی‌سازی باریت و کلسیت در رگه‌ها شکل گرفته است. افزایش شوری در سیال های درگیر می‌تواند به فرایندهایی چون جوشش یا آمیختگی با سیالی با دمای یکسان و شوری بیشتر مربوط باشد. از آنجاکه شواهد جوشش در سیال های درگیر (مانند وجود سیال های دوفازی غنی از مایع و غنی از بخار) دیده نشد، آمیختگی با سیالی با شوری بیشتر که می‌تواند برآمده از آب‌های شور حوضه‌ای باشد را می توان به عنوان عامل مهم در ته‌نشست کانی‌ها در مرحله شکل‌گیری کانی‌سازی باریت و کلسیت دانست. همچنین توالی کانیایی در کانی‌سازی‌های رگه‌ای در منطقه مشکان نشان دهنده تغییر کانی‌های رسی (دگرسانی آرژیلیک) به کانی‌سازی اصلی همراه با کوارتز و باریت و سرانجام رگه و رگچه‌های تاخیری کلسیت است. تغییرات در مجموعه همبری نشان دهنده تکامل محلول گرمابی از شرایط pH اسیدی به قلیایی است.

کانسارهای باریت گرمابی در دمای ۱۵۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد شکل می‌گیرند [۲۱-۲۳]. شوری در این سامانه‌ها دارای گستره‌ای از نزدیک به آب دریا (۳٫۲ درصد وزنی نمک طعام [۲۴]) تا مقادیر بیش از آن است. کانسار باریت مشکان از نظر دمایی و شوری مشابه باریت‌های گرمابی است. همچنین، چنان که پیشتر نیز اشاره شد، مقادیر پایین TiO_2 (کمتر از ۱ درصد) در این کانسار مشابه کانسارهای باریت گرمابی است.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.3.13.7]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.3.711]



شکل ۸ نمودار دمای همگن‌شدگی نسبت به شوری در سیال‌های درگیر منطقه مشکان (محیط های تعریف شده بر گرفته از مرجع [۲۵] هستند.



شکل ۹ نمودار شوری–دمای همگن شدگی سیال‌های درگیر منطقه مشکان. روندهای ممکن تکامل سیال در نمودار دما–شوری برگرفته از مرجع [۱۹] هستند (روند ۱=مخلوط شدگی سیال A با سیال سردتر و شوری کمتر B، روندهای ۲ و ۳=مخلوط شدگی سیال A با سیال های دیگر با شوری مختلف ولی دمای یکسان، روند ۴= افزایش شوری فاز باقیمانده در اثر جوشش، روند ۵=سرد شدگی سیال، روند ۶= باریک شدگی میان‌بارهای سیال و روند ۷= تراوش میان‌بارهای سیال طی گرمایش.

برداشت

بر پایه بررسی های انجام شده در منطقه اکتشافی باریت مشکان، کانی‌سازی به صورت رگه‌ای (با راستای بیشتر شمال-غربی-جنوب‌شرقی و کمتر شمالی-جنوبی) در واحدهای رسوبی به سن ائوسن (کنگلومرا و ماسه‌سنگ) انجام شده است. کانی-شناسی رگه‌ها بسیار ساده (باریت، کوارتز و کلسیت) و از نظر زمان شکل‌گیری جوانتر از ائوسن هستند. بیشترین بی‌هنجاری-های زمین شیمی در رگه‌ها برای روی ۳۹۴ گرم در تن،

آنتیموان ۵۲ گرم در تن و سرب ۹۰ گرم در تن است. اغلب سیال‌های درگیر در نمونه‌های کوارتز، باریت و کلسیت بی‌شکل تا شکل‌دار (مخروطی و به مقدار کمتر میله‌ای) و با اندازه حدود ۴ تا ۱۲ میکرون هستند. کمترین دمای تشکیل باریت ۱۸۱ تا ۳۷۵ درجه سانتی‌گراد بوده و از محلولی دربردارنده نمک‌های NaCl و $CaCl_2$، با شوری ۶ تا ۱۳٫۶ درصد وزنی نمک طعام ایجاد شده است. همزمان با کاهش دما در سیال ها، شوری آنها نیز افزایش یافته است (سیال ها در کانی‌های باریت و کلسیت). به نظر می‌رسد که کاهش دما و آمیختگی با سیالی با شوری بالا (که می‌تواند برآمده از آب‌های شور حوضه‌ای باشد) می‌توانند مهمترین عوامل شکل‌گیری کانی‌سازی باشند. کنترل ساختاری، کانی‌شناسی ساده، بافت، زمین شیمی و نتایج سیال های درگیر نشان از شکل‌گیری باریت در شرایط گرمابی دارد.

توده مربوط به کانی‌سازی در منطقه شناسایی نشد. بنابراین این احتمال وجود دارد که توده عامل کانی‌سازی در عمق یا در فاصله‌ای دورتر از منطقه مورد بررسی باشد. داده‌های زمین شیمیایی بی‌هنجاری عناصری چون آنتیموان، روی و سرب را در رگه‌های باریت نشان می‌دهد. به احتمال بسیار، با توجه به بی‌هنجاری‌های آنتیموان، سرب و روی منطقه مورد بررسی در بخش لبه‌ای و بالایی از یک سامانه کانی‌سازی هستند و محلول ماگمایی در عمق کانی‌سازی را کنترل می‌کند.

قدردانی

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه فردوسی مشهد در ارتباط با طرح شماره ۳٫۴۹۱۱۷ مورخ ۱۳۹۸٫۲٫۳ انجام شده است. از سرکار خانم محبوبه مرادی، آقایان حجت غلامی و علی حسینی برای همراهی در پی‌جویی های صحرایی، جناب آقای مهندس علی تنها برای در اختیار قرار دادن اطلاعات اولیه و جناب آقای ابراهیم عاشق برای دراختیار گذاشتن منزل جهت اسکان در منطقه کمال تشکر را داریم.

مراجع

[1] Ghorbani M., "*The economic geology of Iran: mineral deposits and natural resources*", Springer, New York (2013).

[2] USGS., "*Barite (Advance Release)*", US Geol Surv Miner Yearb-2009 (2011).

[3] Alavi M., *"Sedimentary and structural characteristics of the Paleo-Tethys remnants in northeastern Iran"*, Geological Society of American Bullitan 103 (1991) 983-992.

[4] Karimpur M.H., Malekzadeh Shafaroudi A., Esfandiarpour A., Mohammadnejad H., *"Nyshabour Turquoise mine: The first Cu-Au-ULREE IOCG type in Iran (in Persian)"*, Iranian Journal of Economic Geology 3 (2012) 193-216.

[5] Gholami S., *"Geology, mineralization, geochemistry, and magnetometry of Shotor Sang iron deposit, NE Sabzevar"*, Ms.C thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad (2009) 240p.

[6] Panahi M., *"Geology, petrography, alteration and geochemistry in eastern part of Hamdi kaolin of Halak Abad (southwestern Sabzevar) with view of copper porphyry exploration, and study of mineralization, geochemistry and magnetometry in eastern of Abozar iron mine, Neyshabour (northeastern of Sabzevar)"*, Ms.C thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad (2009) 411p.

[7] Fatehi H., *"Geology, mineralization, and geochemistry of Jalambadan prospect area, NW Sabzevar"*, Ms.C thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad (2013) 240p.

[8] Zaree A., Malekzadeh Shafaroudi A., Karimpour M.H., *"Khanlogh magnetite-apetite deposit, NW Neyshabour: Mineralogy, structure and texture, alteration, and determination of model (in Persian)"*, Iranaian Journal of Crystallography and Mineralogy 1 (24) (2016) 131-144.

[9] Amini B., *"Geological map of Mashkan"*, Scale 1:100,000. Geological Survey of Iran, (2006).

[10] Yazarlo M.A., *"Report of the end of Operation Barite Meshkan"*, (2014) 111p.

[11] Steele-MacInnis M., Lecumberri-Sanchez P., Bodnar R.J., *"HOKIEFLINCS-H_2O-NACL: A Microsoft Excel spreadsheet for interpreting microthermometric data from fluid inclusions based on the PVTX properties of H_2O–NaCl"*, Computer in Geosciences 49 (2012) 334-337.

[12] Rutherford M. J., Devine, A. D., *"Magmatic conditions and magma ascent as indicated by Hornblende phase equilibria and reaction in the 1995-2002, Soufriere Hills Magma"*, Petrology 44 (2003) 1433-1484.

[13] Pearce T. H., Russell J. K., Wolfson I., *"Laser-interference and normarski interference*

homogenize by halite disappearance", Geochimica et Cosmochimica Acta 92 (2012) 14-22.

[21] Herzig P.M., Hannington M.D., Fouquet Y., von Stackelberg U., Petersen S., *"Goldrich polymetallic sulfides from the Lau back arc and implications for the geochemistry of gold in sea-floor hydrothermal systems of the Southwest Pacific"*, Econ Geol 88 (1993), 2182-2209.

[22] de Ronde C.E.J., Faure K., Bray C.J., Chappell D.A., Wright I.C., *"Hydrothermal fluids associated with seafloor mineralization at two southern Kermadec arc volcanoes, offshore New Zealand"*, Miner Deposita 38 (2003), 217-233.

[23] Petersen, S., Herzig, P.M., Schwarz-Schampera, U., Hannington, M.D., Jonasson, I.R., *Hydrothermal precipitates associated with bimodal volcanism in the Central Bransfield Strait, Antarctica"*, Miner Deposita 39 (2004), 358-379.

[24] Bischoff, J.L., Rosenbauer, R.J., *"The critical point and two-phase boundary of seawater, 200–500 °C"*, Earth Planet Sci Lett 68 (1984), 172-180.

[25] Bean, R.E., *"The magmatic-meteoric transition"*, Geothermal Resources Council, Special Report 13 (1983), 245-225.

imaging of zoning profiles in plagioclase phenocrysts from the May 18, 1980, eruption of Mount St. Helens, Washington", American Mineralogist 72 (1987) 1131-1143.

[14] Whitney D.L., Evans B.W., *"Abbreviations for names of rock-forming minerals",* American Mineralogist 95 (2010) 185-187.

[15] Seward T.M., Barnes H.L., *"Metal transport by hydrothermal ore fluids"*, Geochemistry of hydrothermal ore deposits 3 (1997) 435-486.

[16] Barnes H. L., *"Geochemistry of hydrothermal ore deposits"*, Third edition, New York, John Wiley and Sons, (1997) 797pp.

[17] Lottermoser B.G., Ashley P.M., *"Geochemistry and exploration significance of ironstones and barite-rich rocks in the Proterozoic Willyama Supergroup, Olary Block, South Australia",* Journal of Geochemical Exploration 57 (1996) 57–73.

[18] Roedder E., *"Fluid Inclusions"*, In: Ribbe PE (ed) Reviews in Mineralogy, 12, Mineral Soci Am, Washington DC, (1984) 1-644.

[19] Shephered T. J., Rankin A. H., Alderton D. H. M., *"A practical guide to fluid inclusion studies"*, Blackie, London (1985).

[20] Lecumberri-Sanchez P., Steel-MacInnis, M., Bodnar, R.J., *"A numerical model to estimate trapping conditions of fluid inclusions that*

[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.3.13.7]

[DOI: 10.29252/ijcm.28.3.711]